

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

“CALIBRACIÓN DE SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO PARA ESTIMAR EL CONTENIDO DE AGUA EN EL CAMPUS “IRQUIS” DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA.”

Tesis previa a la obtención
del título de Ingeniero Agrónomo

AUTORES: Cajamarca Corte Milton Benito
C.I. 010452956-5
Guamán Padilla José Luis
C.I. 010448933-1

DIRECTOR:
Ing. Ag. Pablo Marcelo Borja Ramón, PhD
C.I. 010294908-8

CUENCA - ECUADOR

2017

RESUMEN

El contenido de humedad del suelo es un parámetro ampliamente usado dentro de la ciencia del suelo y en la actualidad se han desarrollado múltiples tecnologías para estimarlo, como las basadas en la Reflectometría de Dominio Temporal - TDR como una herramienta para monitorear el contenido de agua. El objetivo de este estudio fue obtener una ecuación de calibración para dos tipos de TDR's: CS655 y TRIME FM. El estudio fue realizado en los suelos de la granja experimental Irquis de la Universidad de Cuenca. Este estudio se desarrolló a nivel parcelario, para lo cual se definieron tres zonas y en cada una de ellas se delimitaron parcelas de 25 m². Los tratamientos evaluados incluyeron: i) TDR de medición continua (CS655), ii) TDR de medición manual (TRIME FM), y iii) método gravimétrico. Cada tratamiento fue evaluado bajo tres repeticiones y a tres profundidades: a) 0 - 20, b) 20 - 40 y c) 40 - 60 cm. El periodo de monitoreo fue de 30 días. Al relacionar el contenido volumétrico registrado por el TDR (V_{TDR}) y el Volumen Gravimétrico (V_{GRA}) de laboratorio, se obtuvo una ecuación de calibración representativa para el TDR continuo CS655 ($V_{GRA} = 0.2084 V_{TDR} - 0.3628$) con un coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) de 0.476 para la parcela 1 a la profundidad de 0 - 20 cm. Mientras que, para la profundidad de 20 - 60 cm las ecuaciones de calibración muestran resultados muy bajos (R^2_{aj} entre -0.033 a 0.117), debido a que, durante el desarrollo de esta investigación el suelo del área de estudio permaneció saturado a dicha profundidad. Se concluye que esta ecuación de calibración puede ser usada para monitorear el contenido de humedad en la capa arable bajo estas condiciones de suelo; y al no existir mayor variación en sus propiedades morfológicas con respecto a la profundidad dentro de cada zona de estudio, la misma ecuación podría ser utilizada para capas más profundas. Sin embargo, es impráctico utilizar esta ecuación para la profundidad de 20 - 60 cm debido a que el suelo permanece saturado.

Palabras clave: PROPIEDADES MORFOLÓGICAS, HUMEDAD DEL SUELO, MÉTODO GRAVIMÉTRICO, PROFUNDIDAD DEL SUELO, CALIBRACIÓN, TDR.

ABSTRACT

Soil moisture content is a parameter widely used in soil science and, at present, multiple technologies have been developed to estimate it as those based on Time Domain Reflectometry (TDR) as a tool to monitor water content. The objective of this study was to obtain a calibration equation of two types of TDR's: CS655 and TRIME FM, for the soils of the Irquis experimental farm of the University of Cuenca. This study was developed at the plot level, for which, three areas of 25 m² were defined. The evaluated treatments included: i) TDR (CS655) for continuous measurement, ii) TDR (TRIME FM) for manual measurement, and iii) gravimetric method. Each treatment was evaluated under three repetitions and at three depths: a) 0 - 20, b) 20 - 40 and c) 40 - 60 cm. The monitoring period was 30 days. A representative calibration equation for the continuous TDR CS655 ($V_{GRA} = 0.2084 V_{TDR} - 0.3628$) was obtained by comparing the volumetric content recorded by the TDR (V_{TDR}) with the laboratory gravimetric volume. An adjusted coefficient of determination (R^2_{aj}) of 0.476 was obtained for plot 1 (depth of 0 - 20 cm) being the highest correlation among all three plots. Calibration equations show very low results (R^2_{aj} between - 0.033 a 0.117) for the depth of 20-60 cm, because during the development of this research the soil of the study area remained saturated at that depth. It is concluded that this calibration equation can be used to monitor soil moisture content in the arable layer under these soil conditions; and because there is no greater variation in their morphological properties with respect to depth within each study area, the same equation could be used for deeper layers. However, it is inappropriate to use this equation for the depth of 20 - 60 cm because the soil remains saturated.

Key words: MORPHOLOGICAL PROPERTIES, SOIL MOISTURE, GRAVIMETRIC METHOD, SOIL DEPTH, CALIBRATION, TDR.



ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	14
3. OBJETIVOS.....	15
3.1. Objetivo general	15
3.2. Objetivos específicos	15
3.3. Hipótesis	15
4. REVISIÓN DE LITERATURA	16
4.1. Propiedades morfológicas de los suelos:.....	16
4.1.1. Consistencia del suelo:.....	16
4.1.2. Color del suelo:.....	16
4.1.3. Textura del suelo:	16
4.2. Contenido de humedad en el suelo:.....	17
4.2.1. Métodos de estimación del contenido de humedad del suelo	17
4.2.2. Reflectometría de Dominio de Tiempo (TDR).....	17
4.2.3. Sensores	19
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
5.1. Área de estudio	24
5.2. Materiales y equipos	26
5.3. Metodología	26
5.3.1. Establecimiento de las zonas de caracterización de suelos	26
5.3.2. Medición de las propiedades morfológicas.....	27
5.3.3. Estimación del contenido de humedad y calibración de sensores.....	29
5.4. Análisis estadístico.....	31
6. RESULTADOS Y DISCUSION	33
6.1. Caracterización de las propiedades morfológicas del suelo para el área de influencia de cada sitio de monitoreo.....	34



6.1.1.	Dureza	35
6.1.2.	Friabilidad	35
6.1.3.	Plasticidad	36
6.1.4.	Adhesividad	36
6.1.5.	Textura	37
6.1.6.	Color en seco.....	37
6.1.7.	Color en húmedo	37
6.1.8.	Color en mojado	38
6.2.	Curva de calibración del TDR CS655 para cada parcela de monitoreo en el área de estudio.....	40
6.3.	Discusión.....	44
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
7.1.	Conclusiones.....	47
7.2.	Recomendaciones.....	48
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	50
9.	ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la sonda TRIME – FM	20
Figura 2. Diagrama de la sonda CS655	22
Figura 3. Ortofoto de dron en la cual se observa el área de estudio para la investigación en el campus "Irquis" de la Universidad de Cuenca	24
Figura 4. Distribución de la precipitación media mensual de la zona de acuerdo a los registros de la estación Cumbe	25
Figura 5. Zonas para la caracterización de suelos y localización de las parcelas de monitoreo de humedad del suelo en el campus "Irquis" de la Universidad de Cuenca	27
Figura 6. Puntos de observación para la caracterización de las propiedades morfológicas	28
Figura 7. Diseño de muestreo dentro de las parcelas de 25 m ² para la determinación del contenido de humedad del suelo de acuerdo a los tratamientos a) TDR manual, b) TDR continuo y c) gravimetría	30
Figura 8. Instalación de los sensores TDR de medición continua en tres rangos de profundidad (0-20, 20-40 y 40-60 cm)	31
Figura 9. Perfil del suelo del área de estudio	34
Figura 10. Curvas de calibración para el TDR CS655 obtenidas durante el monitoreo del contenido de humedad del suelo para la profundidad 0-20 cm, por parcela experimental	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de frecuencia (%) de las propiedades morfológicas del suelo encontradas en toda el área de estudio. Se incluye el valor más alto de frecuencia para la categoría especificada	35
Tabla 2. Porcentaje de frecuencias más altos considerados para la descripción de suelos en el área de estudio	39
Tabla 3. Resultados estadísticos de las propiedades morfológicas dentro de cada parcela evaluadas según su profundidad	40
Tabla 4. Ecuaciones de calibración para las distintas profundidades de cada parcela con sus coeficientes de determinación ajustado (R^2_{aj})	41



Universidad de Cuenca
Clausura de derechos de autor

Yo, José Luis Guamán Padilla autor del Trabajo de Titulación **“Calibración de sensores de humedad del suelo para estimar el contenido de agua en el campus “Irquis” de la Universidad de Cuenca”**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Agrónomo. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afectación alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Junio 2017



José Guamán
C.I. 0104489331



Universidad de Cuenca
Clausura de derechos de autor

Yo, Milton Benito Cajamarca Corte autor del Trabajo de Titulación **“Calibración de sensores de humedad del suelo para estimar el contenido de agua en el campus “Irquis” de la Universidad de Cuenca”**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Agrónomo. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afectación alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Junio 2017

Milton Cajamarca
C.I. 0104529565



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

Yo, José Luis Guamán Padilla autor del Trabajo de Titulación **“Calibración de sensores de humedad del suelo para estimar el contenido de agua en el campus “Irquis” de la Universidad de Cuenca”** certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación, son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Junio 2017

José Guamán
C.I. 0104489331



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

Yo, Milton Benito Cajamarca Corte autor del Trabajo de Titulación **“Calibración de sensores de humedad del suelo para estimar el contenido de agua en el campus “Irquis” de la Universidad de Cuenca”** certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación, son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Junio 2017

Milton Cajamarca
C.I. 0104529565



DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Jenny Maguana por su constante apoyo y motivación que fortaleció mi corazón para no rendirme en el camino.

A mi familia por formarme en la persona que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, acompañándome en todo momento, brindándome su apoyo incondicional y con los recursos para alcanzar esta meta.

A mis amigos y a todos aquellos que con sus palabras de aliento me ayudaron a terminar este paso de mi vida. Gracias.

José



AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios por haberme dado la oportunidad de llegar hasta aquí, por haberme dado salud y fuerzas para cumplir mis objetivos y metas

Agradezco a mi familia, por ser un ejemplo de perseverancia y sobre todo me han enseñado a sobresalir siempre adelante.

A mi madre Isabel quién me ha brindado consejos y valores, por su constante motivación, pero sobre todo por su amor.

Agradezco de forma cordial al Dr. Pablo Borja y al Ing. Pablo Quichimbo por haber aceptado dirigir esta investigación de pregrado, ya que con sus consejos se ha desarrollado de forma exitosa.

Agradezco al Ing. Pablo Quichimbo, ya que con su ayuda, se logró publicar parte de esta investigación en la revista "ECUADOR ES CALIDAD".

Al Ing. Franklin Marín quien me ayudo incondicionalmente brindándome conocimientos y consejos hacia la vida profesional.

A la Ing. Jenny Maguana quién me ha acompañado en todo momento, por su apoyo constante, entregándome sus conocimientos y voluntad.

A mis amigos, que estuvieron presente en toda mi vida universitaria: Diego Ayala, Edisson Guachichulca, Juan Jimbo, José Rivera.

José



AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecer:

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar en mí en cada paso que he dado, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi familia, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

A mi director y codirector de tesis, Dr. Pablo Borja e Ing. Pablo Quichimbo por sus esfuerzos y dedicación, quienes con sus conocimientos, sus experiencias su paciencia y sus motivaciones han logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

A mis amigos, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos.

A la institución, por el financiamiento brindado por el “Grupo de Investigación de Suelos” de la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Cuenca.

A los revisores de mi tesis, Dr. Fernando Bermúdez, Ing. Iván Belesaca, Dr. Edison Timbe por sus comentarios constructivos y sus sugerencias que contribuyeron a mejorar este estudio.

Finalmente a los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de mi camino universitario, y que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en el transcurso de mis estudios.

Milton

1. INTRODUCCIÓN

El contenido de agua en el suelo, o humedad del suelo, se refiere al agua almacenada en la zona no saturada del suelo (Dobriyal et al. 2012). El estudio del contenido de agua en medios porosos como el suelo ha sido un tema de gran interés en varias disciplinas (Noborio 2001). Aunque existen varios métodos que se han desarrollado para este fin, los métodos indirectos han sido preferidos por su estimación rápida, y entre ellos están los basados en principios electromagnéticos tales como los radares de penetración del suelo, los sensores remotos de microonda activa y los basados en reflectometría de dominio temporal (Robinson et al. 2003). Estos últimos, conocidos comunmente por sus siglas en inglés como TDRs (Time Domain Reflectometry), han sido reconocidos como unos de los más usados por sus múltiples ventajas tales como: i) una alta precisión, ii) carencia de peligros presentes con otros métodos asociados a la radiación, iii) excelente resolución espacial y temporal, iv) mediciones simples de obtener, con la posibilidad de automatización, y v) requisitos mínimos de calibración bajo ciertas circunstancias (Jones et al. 2002). La tecnología TDR goza de una larga historia ya que ha sido ampliamente usada en diferentes ciencias, especialmente las relacionadas con las ingenierías y con las ciencias naturales; sin embargo, una de las ciencias que más ha contribuido para su rápido crecimiento ha sido la ciencia del suelo (Černý 2009), debido a su relación directa con las actividades de la agricultura, silvicultura, hidrología e inclusive con actividades de ingeniería civil (Topp et al. 1980). Pese a su utilidad Inzunza et al. (2012), Báez et al. (2007) y Jackson (2004), han reportado la necesidad de la calibración del sensor ya sea en laboratorio o in situ, siendo esta última la recomendada para obtener estimaciones más precisas del contenido volumétrico del agua en el suelo (Zanetti et al. 2015).

Dentro de este contexto, este trabajo pretende realizar la calibración de dos tipos de sensores TDR (uno manual y uno de medición continua) frente al método convencional basado en determinaciones gravimétricas de la humedad del suelo. Este trabajo contribuirá de esta forma a un mejor uso de estos equipos para satisfacer las futuras demandas de riego en el área de estudio.

2. JUSTIFICACIÓN

Para la estimación del contenido de humedad del suelo, es conocido que el método gravimétrico, considerado como un método directo, es el más preciso y económico, pero es un método destructivo, demandante de tiempo y no permite la replicación y por lo tanto tiene un limitado uso para mapeo y monitoreo de la humedad del suelo (Dobriyal et al. 2012). Esto ha llevado al desarrollo de métodos alternativos tomando en cuenta la evolución de la electrónica para la medición de las propiedades eléctricas de diferentes materiales que se ha dado en las últimas décadas y que cada día se están volviendo más accesibles (Robinson et al. 2003). Los sensores TDRs se destacan en la actualidad por su amplio uso para la estimación de la humedad, sin embargo, pese a que estudios han encontrado que las estimaciones dadas por este tipo de sensores son de gran precisión para suelos inorgánicos (Zhao et al. 2016), resulta inapropiado para suelos orgánicos, suelos de textura fina y para suelos arcillosos (Campbell Scientific Inc. 2016; IMKO 2001).

En este contexto, dado que los suelos de la zona perteneciente a la Granja Experimental de Irquis de la Universidad de Cuenca, presentan suelos arcillosos (Instituto Espacial Ecuatoriano 2012), es necesario calibrar los equipos para poder obtener estimaciones más precisas del contenido de humedad del suelo (Jackson 2004). De manera que la presente investigación, contribuirá a mediano y largo plazo con las tareas de investigación desarrolladas por el grupo de suelos en el área de estudio que tiene como una de sus metas el establecimiento de una parcela

permanente de investigación, la cual permitirá a futuro obtener un balance del agua automatizado y a tiempo real.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Calibrar los sensores TDR TRIME FM y TDR CS655, para estimar el contenido de humedad de los suelos en el campus Irquis de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades morfológicas del suelo para el área de influencia de cada parcela de monitoreo.
- Obtener una curva de calibración de los TDRs (CS655 y TRIME FM) para cada parcela de monitoreo en el área de estudio.

3.3. Hipótesis

Ha

Es posible mejorar los resultados de la medición de la humedad del suelo utilizando equipos TDR mediante una calibración previa para una unidad edáfica seleccionada (sitio).

Ho

No es posible mejorar los resultados de la medición de la humedad en el suelo utilizando equipos TDR, por tanto no es necesario realizar una calibración previa para una unidad edáfica seleccionada.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Propiedades morfológicas de los suelos:

Atributos observables en el campo dentro de los diferentes horizontes del suelo, estos atributos son: estructura, color, distribución radicular, poros, arcilla y consistencia del suelo, las cuales se muestran en un perfil.

4.1.1. Consistencia del suelo:

Grado de cohesión o adhesión de la masa del suelo. Incluye las propiedades del suelo como la friabilidad, plasticidad, adhesividad y resistencia a la compresión y son altamente dependientes del contenido de humedad a la que se encuentre el suelo (FAO 2009).

4.1.2. Color del suelo:

Es una de las características morfológicas más notables del suelo, el perfil del suelo refleja la composición del contenido de humus y de la parte mineral; por lo que se usa como primera aproximación para juzgar sobre la composición de los horizontes y de todo el suelo (Hernández et al. 2006).

4.1.3. Textura del suelo:

Está relacionada con las cantidades relativas de las partículas primarias del suelo: arena, limo y arcilla; es decir, el tamaño de las partículas que predominan y determina la textura del suelo (Jaramillo 2002).

4.2. Contenido de humedad en el suelo:

Masa o volumen de agua contenida por unidad de suelo, es altamente dependiente de la textura y materia orgánica, por lo tanto puede ser expresado gravimétricamente o volumétricamente (Jaramillo 2002).

4.2.1. Métodos de estimación del contenido de humedad del suelo

El método gravimétrico es el método estándar para medir el contenido de humedad del suelo y se constituye en un método directo. Este método consiste en el cálculo de la humedad por diferencia de peso entre el suelo en condiciones naturales y después de secarlo en la estufa a 105 °C durante 24 horas (Martínez 2006). Debido a su simplicidad se usa para la calibración de muchos otros métodos.

Los métodos indirectos miden alguna propiedad física o química del suelo que está relacionada con el contenido de agua. Estos métodos causan una alteración mínima cuando entran en contacto directo con las partículas del suelo, por lo tanto, las características físicas de la muestra no cambian apreciablemente con su medición. Entre los métodos indirectos tenemos a los TDR (Reflectometría en el Dominio de Tiempo), FDR (Reflectometría en el Dominio de Frecuencia) y ADR (Reflectometría en el Dominio de Amplitud).

4.2.2. Reflectometría de Dominio de Tiempo (TDR)

La técnica de Reflectometría de Dominio de Tiempo (Time Domain Reflectometry, TDR), es un método dieléctrico que estima la constante dieléctrica (K) a partir de la relación existente entre esta y el tiempo de tránsito (tiempo de ida y vuelta de la onda, tt) de una onda electromagnética que se propaga en paralelo a lo largo de una línea de transmisión de una sonda introducida en el suelo (Topp et al. 1984).

La onda electromagnética se propaga a través de un cable coaxial a una sonda TDR, parte de esta onda es reflejada al comienzo de la sonda debido a la diferencia de la impedancia entre el cable y la sonda. El resto de la onda se propaga a través de la sonda hasta que alcanza el extremo de la misma, donde la onda se refleja. El tiempo de ida y vuelta de la onda, desde el principio hasta el final de la sonda, se puede medir por un osciloscopio de muestreo en el probador de cable (Noborio 2001).

$$t = \frac{2L\sqrt{K}}{c}$$

donde: t , es el tiempo (s) de ida y vuelta; L , longitud de la sonda TDR (m); K , La constante dieléctrica aparente del medio, y c , la velocidad de las ondas electromagnéticas en el espacio libre ($3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$).

Organizando la ecuación con respecto a; K nos da:

$$K = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2$$

Los equipos TDR utilizan el alto valor dieléctrico del agua para medir el contenido de humedad volumétrica en el suelo, es decir; el suelo consta de al menos tres componentes, aire ($K=1$), partículas de suelo ($K= 3$ a 5), y agua ($K= 81$). La velocidad está en función de las proporciones de estos tres constituyentes y de la naturaleza del suelo y se calcula a partir de la longitud de los electrodos del sensor y el tiempo de viaje del pulso (Topp et al. 1984).

Como la velocidad de la onda (V_a) está en función de las proporciones del suelo (aire, partículas de suelo y agua), la constante dieléctrica global (K_a) puede ser definida como:

$$K_a = \left(\frac{c}{V_a} \right)^2$$

donde V_a puede ser obtenida de:

$$V_a = \frac{tt}{2L}$$

4.2.2.1. Ecuación de Topp

La ecuación polinomial de tercer grado establecida de una manera empírica por Topp et al. (1984) es usada para convertir la constante dieléctrica (K) en contenido volumétrico del agua en el suelo (Roth et al. 1990).

$$\theta = -5.3E^{-2} + 2.92 E^{-2} (Ka) - 5.5 E^{-4} (Ka)^2 + 4.3 E^{-6} (Ka)^3$$

La universalidad de esta ecuación ha permitido la utilización de TDR en suelos muy diferentes y en ambientes diferidos. Sin embargo, su validez no ha sido demostrada para todos los tipos de suelos con contenidos de agua superiores a 50%, para suelos orgánicos o suelos minerales altos en contenido de arcilla, por lo que su validez debe realizarse para cada tipo de suelo (Jones et al. 2002). Actualmente los sistemas que se comercializan implican la calibración previa del aparato en el campo, esto permite modificar los términos de la ecuación.

4.2.3. Sensores

4.2.3.1. TRIME-FM

El sistema TRIME en tubo es una herramienta para determinar el contenido de agua de los perfiles de suelo a partir de un tubo de acceso de material plástico.

Es fabricado por la compañía alemana IMKO, consiste en dos partes: la batería “TRIME-FM” y la sonda específica “T3” (Fig.1). La batería cuenta con una impedancia interna de 75Ω , la sonda “T3” tienen forma cilíndrica asignada para su fácil posicionamiento en el tubo de acceso, cuenta con una longitud total de 20 cm, tiene en sus filas opuestas 4 platos metálicos que forman 2 varas de 18 cm de guía larga obteniendo un buen contacto con la cara interna del tubo (IMKO 2001).



Figura 1. Diagrama de la sonda TRIME – FM
Fuente: IMKO. 2001

El dispositivo TRIME genera un campo electromagnético alrededor de la sonda TRIME con un pulso de alta frecuencia que se propaga a lo largo de las guías de onda. Al final de las guías de onda, el pulso se refleja de regreso a su fuente. El tiempo del tránsito (t_t) resultante (10 picosegundos – 2 nanosegundos) y la constante dieléctrica (K) es dependiente del contenido de humedad del material. Cuenta con un rango de medición del 0 – 100 % del contenido de agua y una precisión de repetición de $\pm 3\%$. (IMKO 2012).

4.2.3.2. Sensor Campbell CS655

El TDR Campbell CS655 es un sensor mejorado multiparamétrico (producto diseñado para la supervisión de más de una variable, todas estas de gran importancia para determinar el estado del suelo) que utiliza técnicas para combinar medidas de temperatura, humedad y conductividad eléctrica con el fin de vigilar el contenido volumétrico de agua en el suelo (Campbell Scientific Inc, 2016).

La sonda CS655 consta de dos varillas de acero inoxidable de 12 cm de largo conectadas a una placa de circuito impreso. La placa de circuito está encapsulada en epoxi y un cable blindado está conectado a la placa de circuito para la conexión del registro de datos (Fig. 2). Las varillas de las sondas pueden ser insertadas horizontal o verticalmente en la superficie del suelo pero siempre deben tener un buen contacto con el suelo (Campbell Scientific Inc, 2016).

El volumen de suelo explorado por la sonda TDR es de 3600 cm^3 (se aproxima a un cilindro de 7,5 cm de radio alrededor de las guías metálicas, 1,5 cm de separación entre varillas y 4,5 cm más allá del final de las guías), a las temperaturas del suelo que varíen de -10°C a 70°C , el rango de medición oscila de 5 – 50 % del contenido de humedad del suelo, con una precisión $<0.05\%$ (Campbell Scientific Inc, 2016).

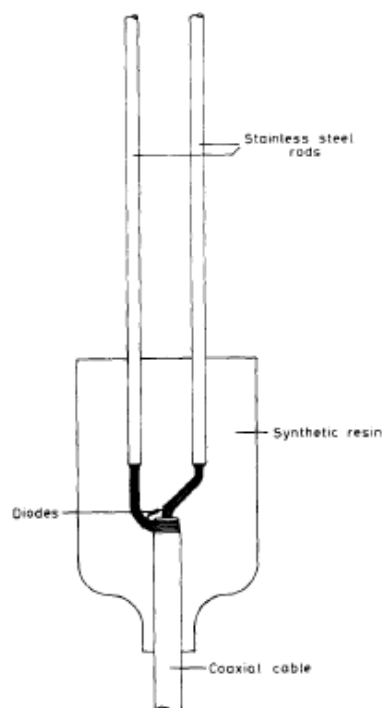


Figura 2. Diagrama de la sonda CS655

Fuente: Ledieu, et al. 1986

El principio fundamental del sensor TDR CS655 es que la velocidad de propagación de la onda electromagnética a lo largo de las varillas depende de la permitividad dieléctrica (debido a los cambios de contenido de agua, pero también es afectado por la conductibilidad eléctrica) del material que rodea las varillas. Cuando el contenido de agua se incrementa, la velocidad de la propagación disminuye debido al incremento de la permitividad dieléctrica.

Cuando el pulso encuentra una discontinuidad producida por las variaciones en la impedancia al momento que la onda pasa del cable al inicio de las varillas insertadas en el suelo, produce un reflejo parcial de la onda que regresa al reflectómetro y un segundo reflejo que se produce cuando dicha onda alcanza el campo abierto al salir del extremo final de las varillas.

4.2.3.3. Calibración de los sensores TDR

En ciertos casos, los TDR no requieren de una calibración para estimar el contenido de humedad del suelo, este es el caso de suelos con bajos contenidos de materia orgánica, y suelos con menos del 50 % de humedad (Campbell Scientific Inc, 2016; IMKO 2001). En el Ecuador no existen estudios sobre la calibración de los sensores dieléctricos (TDR y FDR) a nivel de parcela, debido a que existen características diversas de suelos con altos contenidos de arcilla y materia orgánica, que limitan una lectura precisa del sensor de humedad, por lo que surge la necesidad de realizar calibraciones en suelos donde se pretenda utilizarlos. Al existir características diversas de suelos en distintos países con altos contenidos de arcilla y materia orgánica, que limitan una lectura precisa del sensor de humedad, propicia la necesidad de realizar calibraciones en suelos donde se pretenda utilizarlos. Al momento, en el Ecuador existe un limitado estudio sobre la calibración a nivel de parcela de los sensores dieléctricos (TDR-FDR). Para la calibración de los sensores TDR se empleó un enfoque de calibración a nivel de parcela. La calibración a nivel de parcela es un método escasamente utilizado debido a que los factores físicos y meteorológicos son más difíciles de controlar. A diferencia de la calibración en laboratorio que ha sido un método ampliamente utilizado por varios autores (Borja et al. 2008; Naranjo y Ataroff 2015), en ciertos grupos de suelos como: Andosoles, Histosoles, Ultisoles, Inseptisoles.

Para la calibración en laboratorio se emplean grandes anillos con muestras de suelos en volúmenes no mayores a 60.000 cm^3 . Para la determinación del contenido de humedad suelen emplearse cilindros de volúmenes muy pequeños (3 cm de diámetro) con los que se extraen muestras de suelo de forma periódica en un espacio determinado. Estos cilindros de volúmenes pequeños pueden presentar errores al momento de la calibración. Por esta razón en la realización de este trabajo se optó por hacer la calibración en campo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Área de estudio

La zona de investigación está ubicada al Sur de los Andes del Ecuador, provincia del Azuay, cantón Cuenca, al este de la parroquia Victoria del Portete, en la parte baja de la microcuenca del Rio Tarqui, campus “Irquis” de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca (Fig. 3).

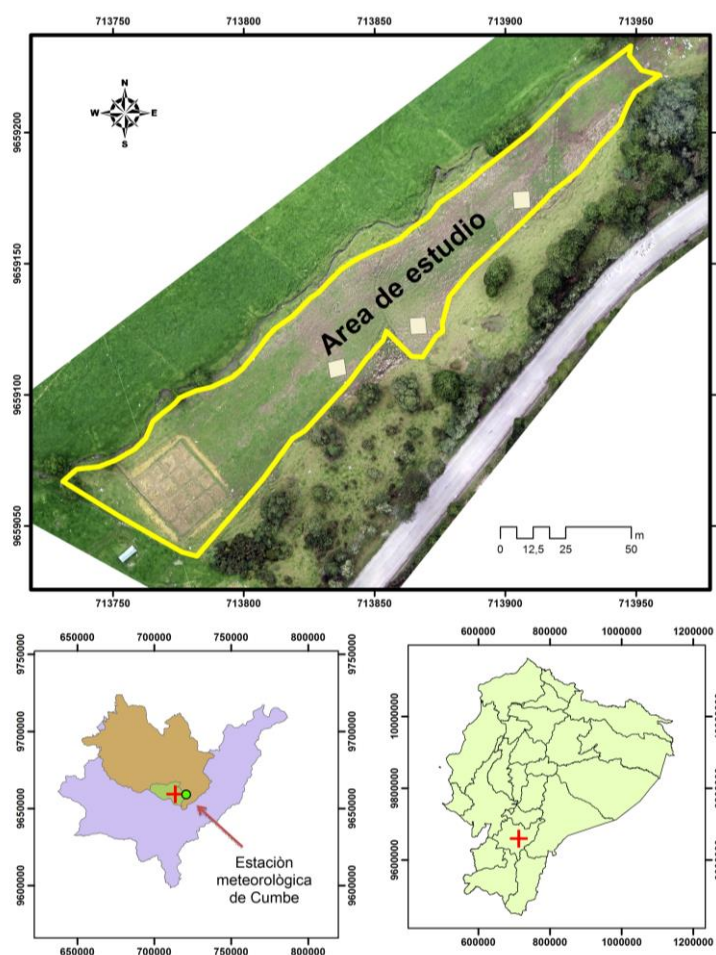


Figura 3. Ortofoto de dron en la cual se observa el área de estudio para la investigación en el campus "Irquis" de la Universidad de Cuenca

Fuente: Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad de Cuenca

Elaborado por: Guamán, 2015

El área aproximada de estudio es de 8500 m², tiene una topografía plana (5% de pendiente) y está ubicada a 2600 m s.n.m. La precipitación media anual es de 650 mm/año, con un periodo de mayor precipitación durante Octubre-Mayo mientras que el de menor precipitación es de Junio a Septiembre (Fig. 4), con temperaturas promedio diarias de 11-12 °C. Los datos meteorológicos fueron recopilados de la estación de Cumbe que dispone con un registro de datos comprendido entre los años 1963 a 1998, ubicada entre las coordenadas 9658683 m N y 720613 m E, con la zona de estudio (PROMAS 2012). Los suelos del área de estudio son Vertisoles (suelos arcillosos que albergan gran cantidad de arcillas expansivas), poco orgánicos según la cartografía de suelos escala 1:25.000 (Instituto Espacial Ecuatoriano 2012). El uso del suelo corresponde a zonas de pastos degradados.

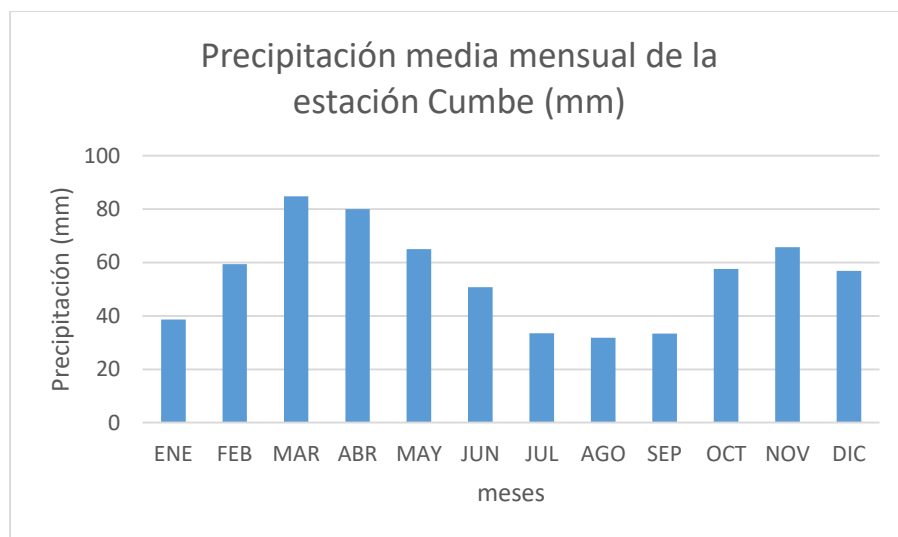


Figura 4. Distribución de la precipitación media mensual de la zona de acuerdo a los registros de la estación Cumbe

Fuente: PROMAS 2012

5.2. Materiales y equipos

a) Materiales

Anillos Kopecky, toma muestras para anillos Kopecky, barreno, cuaderno de apuntes, flexómetro, martillo de goma, pala, barreta, pico o azadilla, plástico, fundas plásticas, martillo, clavos, postes de madera, rollo de piola, guía para la descripción de suelos de la FAO (2009), fichas de levantamiento de datos (Anexo 1), tamiz 2mm, pinzas para seleccionar raíces

b) Equipos

Cámara de fotos, TDR CS655, TDR TRIME FM, balanza electrónica, estufa, computador

c) Software

R versión 3.3.2 y QGIS versión 2.8.2

5.3. Metodología

5.3.1. Establecimiento de las zonas de caracterización de suelos

En el área de estudio se definieron cuatro zonas en base a delimitaciones definidas por los canales de evacuación hídrica (canales de drenaje) ya presentes en el área de estudio (Fig. 5).

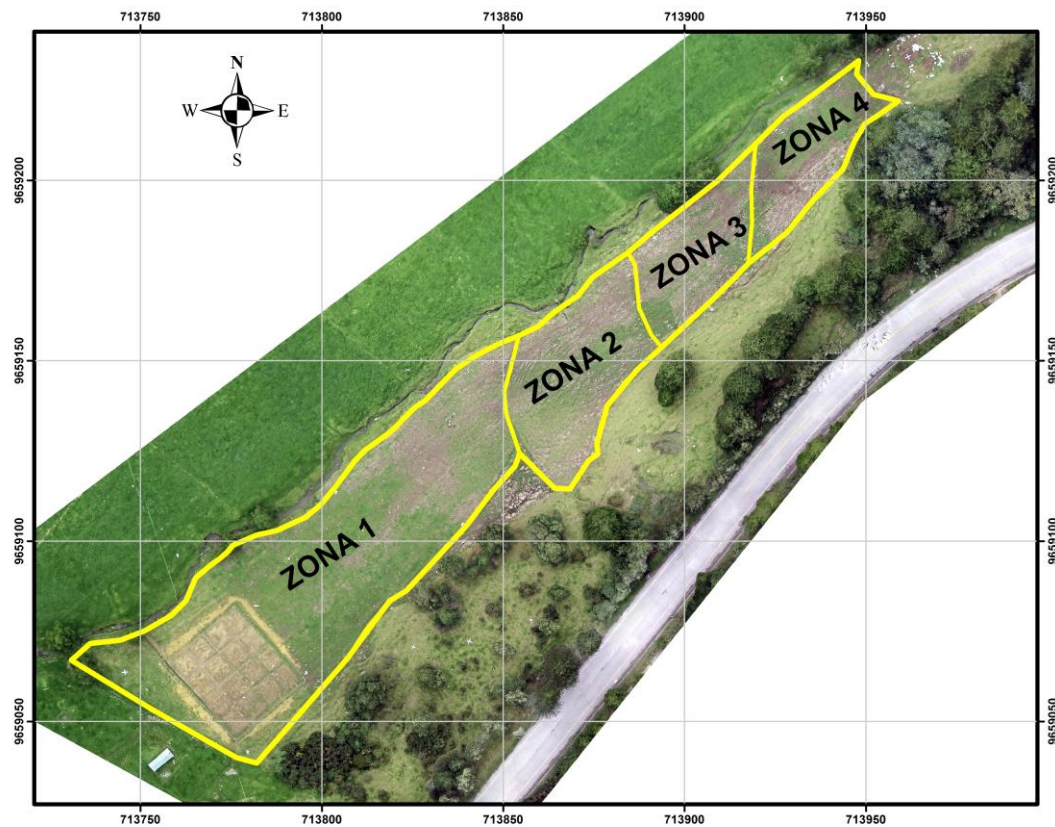


Figura 5. Zonas para la caracterización de suelos y localización de las parcelas de monitoreo de humedad del suelo en el campus “Irquis” de la Universidad de Cuenca

Fuente: Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad de Cuenca

5.3.2. Medición de las propiedades morfológicas

Las propiedades morfológicas fueron caracterizadas en base a un muestreo sistemático en toda el área de estudio excepto para la cuarta zona debido a la presencia de la tubería del sistema de riego que imposibilitó la instalación de la parcela de monitoreo de humedad, por lo tanto, el estudio se realizó para las tres zonas de estudio. El diseño sistemático consistió en la determinación de puntos de muestreo equidistantes a 10 m (Fig. 6). En cada punto se tomaron muestras de suelos a tres profundidades: 0-20, 20-40 y 40-60 cm usando un barreno cilíndrico.

Las propiedades morfológicas consideradas fueron las siguientes: 1) dureza, 2) friabilidad, 3) plasticidad, 4) adhesividad, 5) textura, y 6) color. Todas estas propiedades fueron determinadas usando la Guía para la Descripción de Suelos de la FAO (FAO 2009), exceptuando la textura que fue estimada por el método de “textura al tacto” (Thien 1979). Todas las muestras de suelos fueron secadas a 40°C y tamizadas (Tamiz N° 10) previo a la determinación de las propiedades morfológicas, las mismas que se determinaron sobre la fracción de tierra fina del suelo (granulometría inferior a 2 mm).

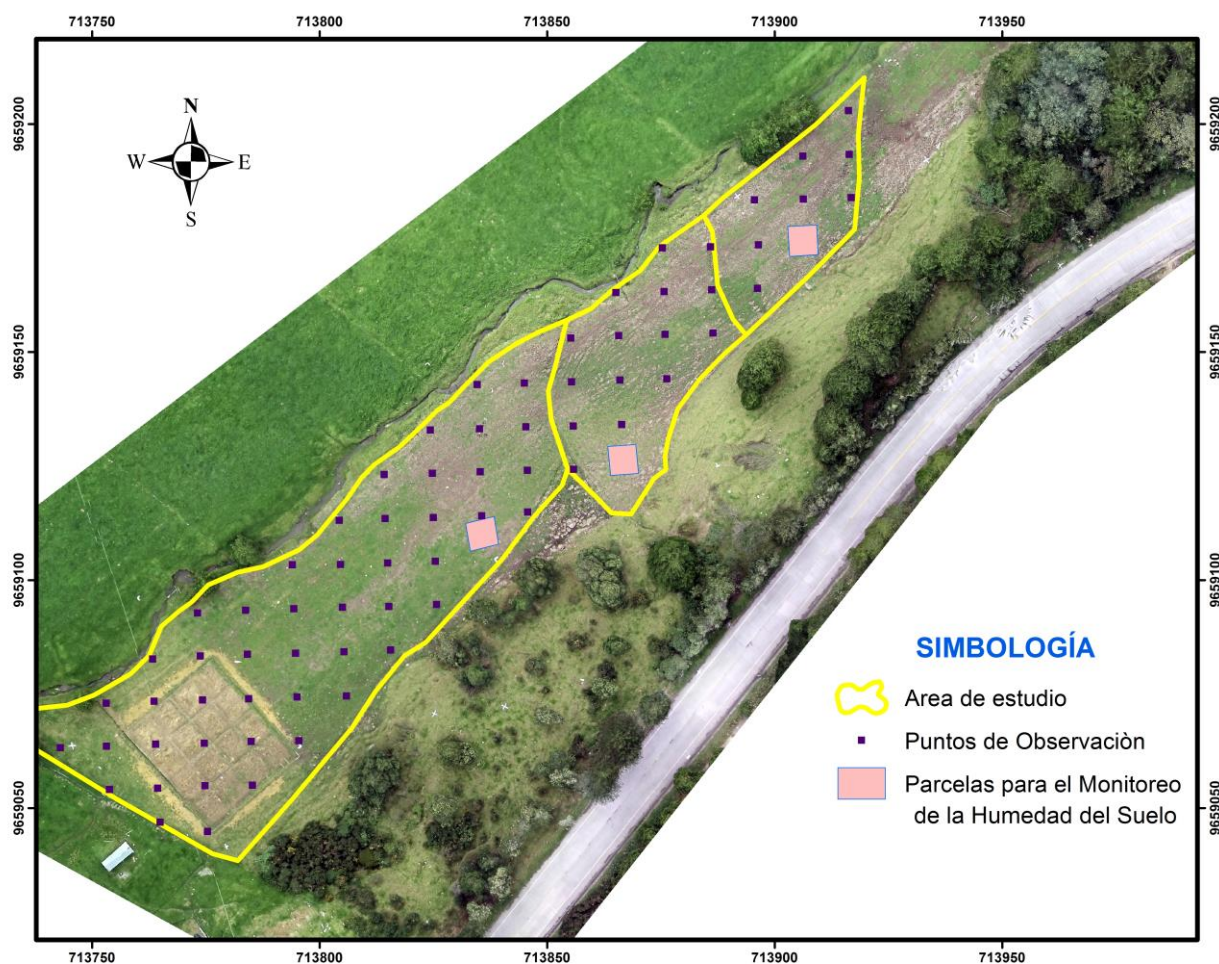


Figura 6. Puntos de observación para la caracterización de las propiedades morfológicas

Fuente: Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad de Cuenca

5.3.3. Estimación del contenido de humedad y calibración de sensores

En cada una de las tres zonas de estudio se instaló una parcela para el monitoreo de la humedad edáfica; todas las parcelas se ubicaron en la parte superior de las zonas de caracterización de suelos, como una alternativa para evitar que estas interfieran en las actividades agropecuarias del terreno, debido a que la zona de estudio es una zona de explotación de pastos para la ganadería de la granja de la Universidad y además para disminuir el efecto del ascenso de la tabla de agua en el terreno ya que el área de estudio se encuentra junto a una quebrada.

Cada parcela fue delimitada con un área de 25 m² (5 x 5 m). La entrada de agua a cada parcela fue limitada por la excavación de zanjas a los cuatro lados, las mismas que tuvieron 1 m de ancho con 1.50 m de profundidad y además para evitar la entrada de agua de la lluvia se construyó una estructura de madera cubierta con un techo de plástico abierta en sus lados para evitar la evapotranspiración, puesto que, al existir mayor evapotranspiración y un nivel freático muy elevado en esta área de estudio, la lámina de agua tiende a subir por capilaridad, evitando así llegar a un secado del suelo.

El contenido de humedad del suelo fue estimado en base a tres tratamientos: 1) TDR de medición continua TDR CS655 (Campbell Scientific, Inc.), 2) TDR de medición manual, TDR TRIME FM (IMKO, GmbH, Germany) y 3) el método gravimétrico, usando anillos de kopecky de 100 cm³. Los tres tratamientos fueron evaluados a tres profundidades: a) 0-20 cm, b) 20-40 cm, y c) 40-60 cm y se consideraron tres repeticiones, para lo cual se establecieron subparcelas de 1 m² dentro de cada parcela, teniendo en total 9 subparcelas de monitoreo distribuidas al azar dentro de la parcela (Fig. 7) La frecuencia de monitoreo fue de 30 días para cada parcela después de un riego intenso durante 5 días consecutivos.

Para los tratamientos: gravimétrico y TDR manual, los puntos de medición se definieron aleatoriamente (randomización sin reemplazo) dentro de cada subparcela dentro de un conjunto de 100 puntos, tomándose 30 puntos, uno por día (Ver Anexo 2). En tanto que para el tratamiento de los TDR de medición continua, éstos fueron instalados en la parte media de cada profundidad (Fig. 8) y programados para mediciones cada 30 minutos, cuyos datos se registraron en un datalogger.

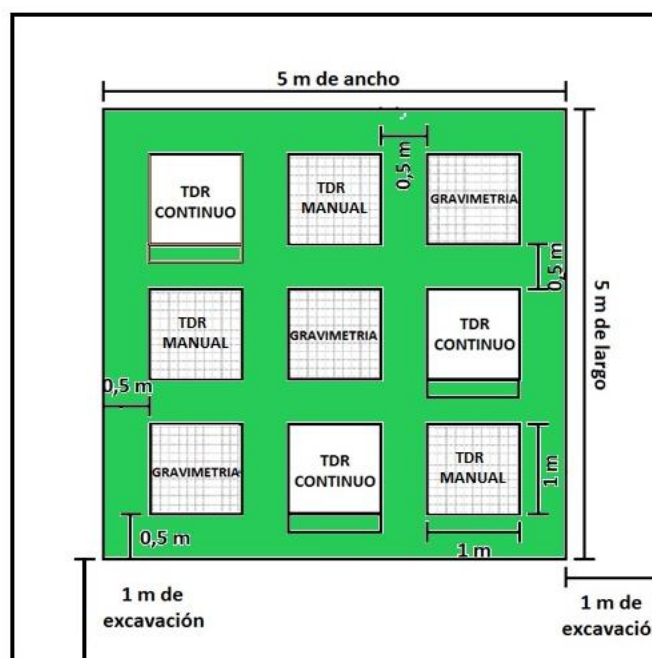


Figura 7. Diseño de muestreo dentro de las parcelas de 25 m² para la determinación del contenido de humedad del suelo de acuerdo a los tratamientos
a) TDR manual, b) TDR continuo y c) gravimetría

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

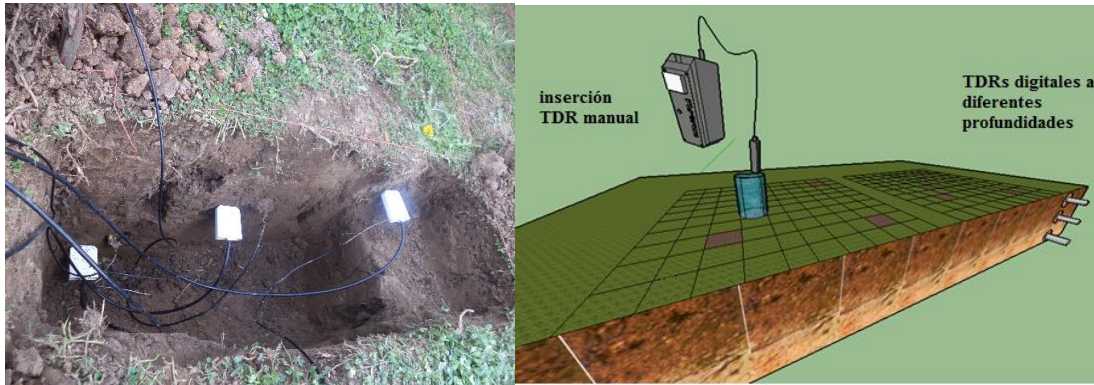


Figura 8. Instalación de los sensores TDR de medición continua en tres rangos de profundidad (0-20, 20-40 y 40-60 cm)

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

Los mapas (figuras 3, 5 y 6) de ubicación del área de estudio fueron elaborados usando el software QGIS 2.8.2 (QGIS Development Team 2016).

5.4. Análisis estadístico

Para la caracterización de las propiedades morfológicas de los suelos, las variables fueron transformadas de variables categóricas a variables cuantitativas siguiendo los procedimientos propuestos por Birkeland (1999). Estos datos fueron analizados mediante estadísticos descriptivos (análisis de frecuencias, medidas de tendencia central y de dispersión). Se analizaron las diferencias estadísticas entre zonas y también diferencias dadas por las profundidades dentro de cada zona, para lo cual se aplicaron pruebas no paramétricas de Kruskal & Wallis al 5% de significancia.

Para la estimación del contenido de humedad y la posterior calibración de los sensores TDR, se empleó un enfoque de calibración estadística, la calibración estadística ha sido un método ampliamente usado por varios autores (Baez et al. 2007; Borja et al. 2008; Murillo et al. 2008). Los datos fueron analizados en base a contenido volumétrico de la humedad del suelo. Los datos volumétricos fueron analizados por medio de análisis de correlación y análisis de regresión previo a la

comprobación de la normalidad de los datos por medio de la prueba Shapiro-Wilks y la prueba de Bartlett para la comprobación de la homocedasticidad, ambas evaluadas al 5% de significancia, en el caso de no cumplir con los requisitos de la normalidad se aplicaron transformaciones de los datos por medio de transformaciones Box-Cox. Para la calibración se consideró al método de gravimetría como el método de referencia. La ecuación para la calibración de la recta es del tipo $\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 x$, y se utiliza para explorar y cuantificar la relación entre una variable dependiente y una variable independiente.

Donde:

“ \hat{Y} ” = es la humedad volumétrica obtenido en el laboratorio.

“ β_0 ” = es la intersección con la ordenada o eje de Y, en un plano cartesiano. Se conoce como el “coeficiente de posición”.

“ β_1 ” = es la pendiente, que nos indica el crecimiento o decrecimiento por cada unidad de tiempo. Se conoce como el “coeficiente angular”.

“ x ” = es la señal del TDR.

Todos los análisis estadísticos fueron desarrollados bajo el entorno del Software R 3.3.2 (R Development Core Team 2013).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La granja de Irquis presenta una geomorfología diferenciada en tres formas definidas por su posición en el paisaje; al noreste, existen suelos desarrollados sobre una playa aluvial, con altos contenidos de arcilla, mapeados por el PRONAREG como vertisoles Pellustert (suelo negro, plástico y adhesivo en húmedo, duro y con grietas en seco, en regiones planas; permanecen secos durante más de 90 días consecutivos). Sin embargo, estos suelos presentan hidromorfismo debido a los constantes encharcamientos y ascensos del nivel freático, una mejor descripción para estos suelos estaría dentro del suborden de los Aquerts (suelos que permanecen húmedos temporalmente o todo el tiempo, debido a su gran contenido en arcilla que reduce la permeabilidad produciendo acumulación de agua). Hacia el centro de la propiedad, la tierra se eleva algunos metros sobre el nivel del río, el suelo es poco profundo con un horizonte Ap de unos 40 cm, de textura franco arenosa, yaciendo sobre un horizonte consolidado con arcilla masiva y poca permeabilidad, a estos suelos se los ha clasificado como Chromusterts (suelos que presentan inundación frecuente casi todos los años), sin embargo por las condiciones de humedad, mejor estarían situados dentro del suborden de los Uderts (tienen grietas que están abiertas menos de 90 días acumulativos al año). Entre la carretera panamericana y la terraza se encuentra el área para esta investigación, la cual está delimitada por una pequeña quebrada, provocando que los suelos permanezcan encharcados durante la época de lluvias (Fig. 9), además de que sufren las condiciones adversas del pisoteo por el ganado (PROMAS 2012). Además, se presume que existen depósitos de material de la vía, esto da como resultado una variación en las características morfológicas de los suelos.



Figura 9. Perfiles del suelo del área de estudio
Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

6.1. Caracterización de las propiedades morfológicas del suelo para el área de influencia de cada sitio de monitoreo

La tabla 1 muestra de forma general la mayor distribución de frecuencias (%) de las propiedades morfológicas del suelo encontradas en toda el área de estudio. Las muestras analizadas presentan una dureza que está clasificada como “Extremadamente duro” (33.80 %). En cuanto a la friabilidad los suelos varían entre “Muy friable” (27.70%) a “Friable” (23.47%). La mayor parte del área de estudio corresponden a la categoría de “Plásticos” (54.17%). Además son suelos donde predomina la propiedad “Adherente” (54.92%). De color “Naranja amarillento opaco” (76.056 %) en estado seco; “Marrón oscuro” (33.80 %) a “Negro parduzco” (41.31 %), en húmedo y “Marrón oscuro” (73.70 %) en mojado. Finalmente la clase textural predominante es “Arcilloso” (43.19 %) y “Arcillo arenoso” (44.13 %). La totalidad de la distribución de la frecuencia (%) de las propiedades morfológicas del suelo se presenta a mayor detalle en el anexo 4.

Tabla 1. Distribución de frecuencia (%) de las propiedades morfológicas del suelo encontradas en toda el área de estudio. Se incluye el valor más alto de frecuencia para la categoría especificada.

Variable	Porcentaje
Dureza	Extremadamente duro (33.80%)
Friabilidad	Muy friable (27.70%)
Plasticidad	Plásticos (54.17%)
Adhesividad	Adherente (54.92%)
Textura	Arcilloso (43.19 %)
	Arcillo arenoso (44.13 %)
Color en seco	Naranja amarillento opaco (76.06 %)
Color en húmedo	Negro parduzco (41.31 %)
Color en mojado	Marrón oscuro (73.70 %)

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

La medición de las propiedades morfológicas fue evaluada entre zonas y entre profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) las mismas que se describen a continuación.

6.1.1. Dureza

Las zonas resultaron ser diferentes estadísticamente ($p < 0.001$) debido a que, los suelos de las zonas 2 y 3 tienden a ser más estables en toda su profundidad (0 – 60 cm) y no pueden disgregarse entre la mano cuando se aplica una presión extremadamente dura, a diferencia de la zona 1 que tiende a disgregarse con una presión considerable (tabla 2). Sin embargo, de acuerdo al análisis de todas las profundidades dentro de cada zona, la categoría de la dureza no muestra variabilidad (tabla 3).

6.1.2. Friabilidad

Las zonas resultaron ser diferentes estadísticamente ($p < 0.001$). Esto puede explicarse porque, los suelos de la zona 1 son coherentes cuando se aplica una

presión suave a moderada entre los dedos a una masa de suelo húmedo, clasificándola como “Muy friable” a “Friable”. A diferencia de la zona 3, que empieza a poseer una resistencia evidente. Mientras que la zona 2 muestra resistencia fuerte y no puede aplastarse entre los dedos clasificándola como “Firme a muy firme” y “Muy firme a extremadamente firme” (tabla 2).

Las diferencias de las categorías de friabilidad dentro de cada zona fueron analizadas según su profundidad, donde se observa que, solamente la zona 1 resulta ser diferente estadísticamente (tabla 3). Esto puede explicarse, porque la zona 1 posee mayor superficie y por ende existe mayor variación, también se debe a que existen áreas donde sus partículas fueron alteradas por labranza y pisoteo de ganado.

6.1.3. Plasticidad

Las zonas resultaron ser diferentes estadísticamente ($p=0.02967$). Esto puede explicarse porque los suelos para la zona 1 son “Plásticos” en toda su profundidad, a diferencia de las zonas 2 y 3 que muestran variación entre “Plástico” y “Muy plástico” (tabla 2) esto puede deberse a la presencia de arcilla, materia orgánica y contenido de humedad en el suelo. Sin embargo, al analizar las categorías de plasticidad dentro de cada zona, según su profundidad se muestra que, en la zona 3 existe una mínima diferencia estadísticamente, debido a que, presenta mayor plasticidad a profundidades mayores de 20 cm (tabla 3).

6.1.4. Adhesividad

Las zonas resultaron ser diferentes estadísticamente ($p<0.001$). Esto puede explicarse porque las zonas 2 y 3 varían entre “Adherente” y “Adherente a muy adherente”. A diferencia de la zona 1 que varía entre “ligeramente adherente” y “adherente” (tabla 2). Sin embargo, al analizar las categorías de adhesividad

dentro de cada zona, según su profundidad muestran que, las zonas son iguales estadísticamente (tabla 3), debido a que, en todas las zonas existe presencia de arcilla.

6.1.5. Textura

Las zonas resultaron ser diferentes estadísticamente para todas las fracciones de limo, arena y arcilla presentándonos una clase textural que varían entre “Arcillo arenosos” y “Arcillosos” en las tres zonas de estudio (tabla 2). Sin embargo, las diferencias de las fracciones de la textura de cada zona analizadas según su profundidad muestran que, solamente la zona 1 tiene diferencias estadísticas en la fracción de limo (tabla 3). Esto puede explicarse porque son suelos alterados, mostrando así variabilidad en sus fracciones entre sitios.

6.1.6. Color en seco

Las zonas resultaron ser estadísticamente iguales, tanto entre zonas ($p=0.518$), como entre profundidades, con un color “Naranja amarillento opaco” mostrando mayor homogeneidad de color (tablas 2 y 3). Esto puede explicarse porque el color está determinado por la cantidad y estado de los minerales, así como de la materia orgánica.

6.1.7. Color en húmedo

Las zonas resultaron ser iguales estadísticamente ($p=0.703$), dominando el color oscuro (tabla 2). Sin embargo, al evaluar cada zona según su profundidad se observa que, existen diferencias significativas en las 3 zonas de estudio (tabla 3).

6.1.8. Color en mojado

Las zonas resultaron ser iguales estadísticamente ($p=0.7591$) dominando el color “Marrón oscuro” mostrando así una mayor homogeneidad de color (tabla 2). Sin embargo, las diferencias de cada zona analizadas según su profundidad muestran que, la zona 3 presenta una diferencia significativa (tabla 3).

Tabla 2. Porcentaje de frecuencias más altos considerados para la descripción de suelos en el área de estudio

Zona	Prof (cm)	Dureza (%)	Friabilidad (%)	Plasticidad (%)	Adhesividad (%)	Textura (%)	Color_seco (%)	Color_humedo (%)	Color_mojado (%)
1	0 - 20	29.17 VHA	37.5 FR	52.08 PL	54.17 ST	54.17 SaCl	81.25 Naranja amarillento opaco	70.83 Negro pardusco	79.17 Marrón oscuro
	20 - 40	41.67 HA	41.67 VFR	56.25 PL	47.92 ST	54.17 Cl	81.25 Naranja amarillento opaco	50 Marrón oscuro	72.92 Marrón oscuro
	40 - 60	41.67 HA	41.67 VFR	54.17 PL	45.83 ST	54.17 Cl	77.08 Naranja amarillento opaco	50 Marrón oscuro	68.75 Marrón oscuro
2	0 - 20	83.33 EHA	41.66 EFI	66.67 PL	66.67 ST	66.67 SaCl	58.33 Naranja amarillento opaco	83.33 Negro pardusco	58.33 Marrón oscuro
	20 - 40	66.67 EHA	25 VFR	50 VPL	50 ST	33.33 SaCl	66.67 Naranja amarillento opaco	50 Marrón	75 Marrón oscuro
	40 - 60	66.67 EHA	25 VFR	50 VPL	50 ST	33.33 SaCl	75 Naranja amarillento opaco	41.67 Marrón oscuro	66.67 Marrón oscuro
3	0 - 20	63.64 EHA	63.64 FRF	45.45 PL	72.73 ST	90.91 SaCl	63.64 Naranja amarillento opaco	90.91 Negro pardusco	90.91 Marrón oscuro
	20 - 40	54.55 EHA	36.36 FI	72.73 VPL	81.82 ST	54.55 SaCl	81.82 Naranja amarillento opaco	63.64 Marrón oscuro	90.91 Marrón oscuro
	40 - 60	54.55 EHA	36.36 FI	72.73 VPL	81.82 ST	54.55 SaCl	63.64 Naranja amarillento opaco	45.46 Marrón	63.64 Marrón oscuro

Prof: profundidad, **VHA:** muy duro, **HA:** duro, **EHA:** extremadamente duro, **FR:** friable, **VFR:** muy friable, **EFI:** extremadamente firme, **FRF:** friable a firme, **FI:** firme, **PL:** plástico, **VPL:** muy plástico, **ST:** adherente, **SaCl:** arcillo arenoso, **Cl:** arcilloso.

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

Tabla 3. Resultados estadísticos de las propiedades morfológicas dentro de cada parcela evaluadas según su profundidad

Variable	<u>Valor de p (nivel de significación)</u>		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Dureza	0.1086	0.5933	0.9553
Friabilidad	0.01086	0.5121	0.8762
Plasticidad	0.8337	0.07573	0.01313
Adhesividad	0.9245	0.5637	0.3888
Arena	0.07965	0.09818	0.5689
Limo	0.023	0.1749	0.1392
Arcilla	0.2607	0.1749	0.5689
Color_seco	0.3208	0.1121	0.2156
Color_humedo	0.0001944	0.009654	0.00934
Color_mojado	0.7235	0.4756	0.04722

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

6.2. Curva de calibración del TDR CS655 para cada parcela de monitoreo en el área de estudio

Se obtuvieron ecuaciones de calibración para cada profundidad de cada zona, para el sensor continuo - TDR CS655, excepto para el sensor manual - TDR TRIME FM que presentó problemas inesperados al séptimo día de monitoreo del contenido de humedad del suelo, razón por la cual no se dispone de un muestreo representativo para realizar su calibración por lo que se procedió a eliminarlo como tratamiento en la investigación.

Las ecuaciones de calibración se obtuvieron mediante un análisis de regresión lineal simple entre el volumen de agua del suelo medido a través del método gravimétrico (V_{GRA}) y el medido a través del TDR CS655 (V_{TDR}), junto a un intervalo de confianza de 95% de las medias durante todo el estudio.

Al relacionar el contenido volumétrico registrado por el TDR (V_{TDR}) y el volumen Gravimétrico (V_{GRA}) se obtuvo un buen ajuste en la ecuación de calibración para la profundidad de 0 – 20 cm en la parcela uno, mientras que, el contenido volumétrico estimado entre ambos métodos de medición a profundidades mayores de 20 cm no dieron buenos resultados (tabla 4 y Fig. 10) debido a que existe un comportamiento hídrico muy variable, evidenciando así, que la pérdida de agua en la superficie del suelo es mucho más rápida que en la profundidad, esta situación puede ser originada por el alto contenido de arcilla presente en las capas más profundas que impiden la infiltración de agua.

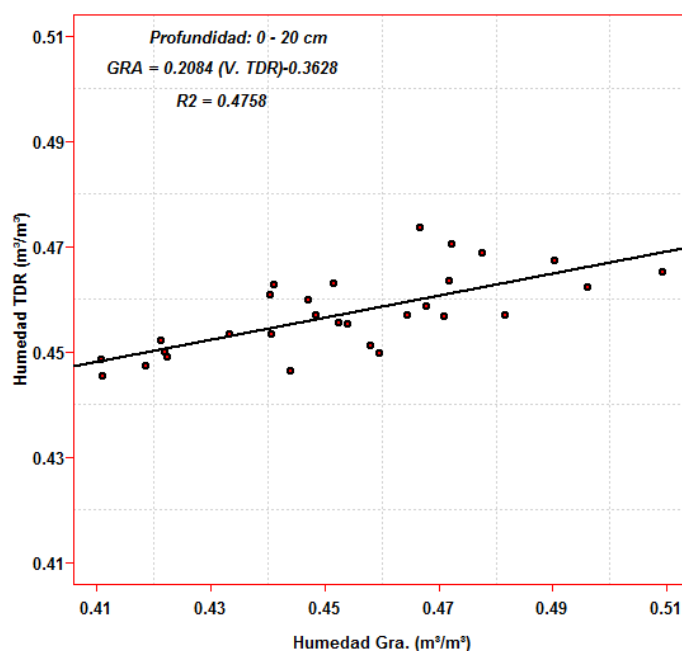
Tabla 4. Ecuaciones de calibración para las distintas profundidades de cada parcela con sus coeficientes de determinación ajustado (R^2_{aj})

Profundidad (cm)	Ecuación	R^2_{aj}	valor de P
Parcela 1			
0 – 20	$V_{GRA} = 0.2084 (V_{TDR}) - 0.3628$	0.476	< 0.001
20 – 40	$V_{GRA} = 0.4920 + 0.0115(V_{TDR})$	-0.032	0.754
40 – 60	$V_{GRA} = 0.4839 + 0.0287 (V_{TDR})$	-0.028	0.639
Parcela 2			
0 – 20	$V_{GRA} = 0.3867 + 0.1712 (V_{TDR})$	0.086	0.067
20 – 40	$V_{GRA} = 0.4821 + 0.0357 (V_{TDR})$	-0.025	0.591
40 – 60	$V_{GRA} = 0.5048 - 0.0109 (V_{TDR})$	-0.033	0.789
Parcela 3			
0 – 20	$V_{GRA} = 0.4324 + 0.2609 (V_{TDR})$	0.117	0,042
20 – 40	$V_{GRA} = 0.5069 - 0.0265 (V_{TDR})$	-0.028	0.644
40 – 60	$V_{GRA} = 0.4552 + 0.1369 (V_{TDR})$	0.051	0.129

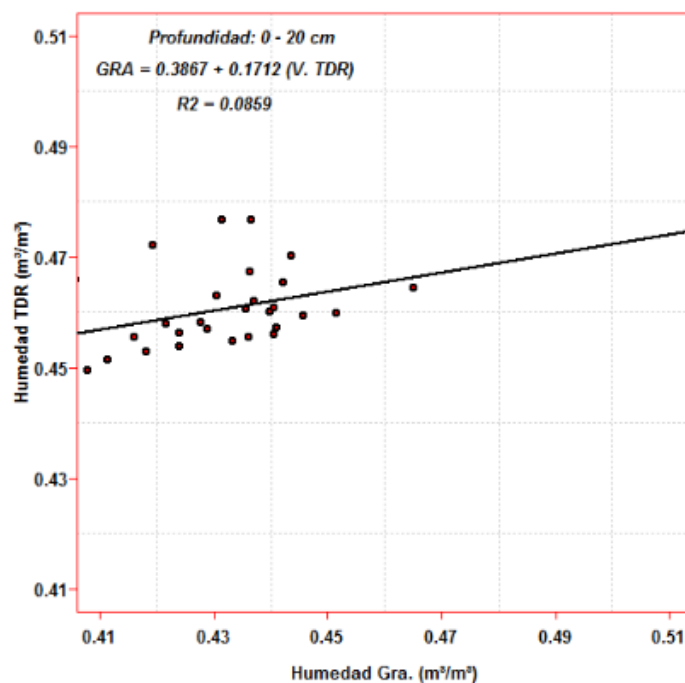
R^2_{aj} = coeficiente de determinación ajustado; valor de P = nivel de significación.

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

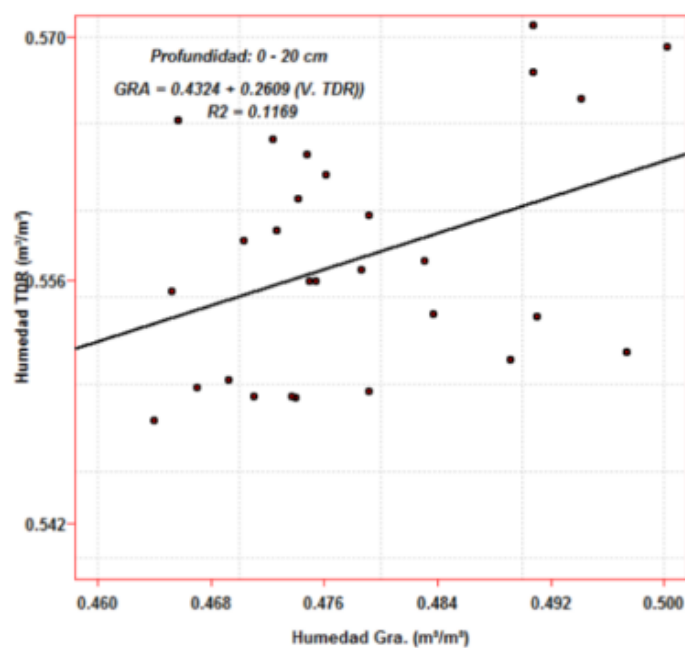
Por otro lado, un factor importante que se evidenció en campo fue un nivel freático muy elevado que formaba láminas de agua en la parte baja (100 – 150 cm) del perfil del suelo durante todo el proceso de monitoreo en todas las parcelas, lo que explica que el ascenso de la tabla de agua fue el principal factor influyente en la humedad hacia capas superiores del suelo, debido a esto el sensor presentó registros de humedad correspondientes a 999999 (lectura errónea), a profundidades mayores a 20 cm. Respecto a esto, Campbell Scientific (2016) indica, que el contenido de humedad esta fuera del rango operacional del sensor (5 – 50 % de humedad).



Parcela 1



Parcela 2



Parcela 3

Figura 10. Curvas de calibración para el TDR CS655 obtenidas durante el monitoreo del contenido de humedad del suelo para la profundidad 0-20 cm, por parcela experimental

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

6.3. Discusión

A partir de estos resultados podemos establecer de forma general que son suelos que no difieren mayormente en sus propiedades morfológicas dentro de cada zona. Pero, al ser suelos cercanos a la carretera, existe la probabilidad de que haya influencia de material coluvial, presentando así en cortas distancias, paisajes diferentes (vegetación con características diferenciadas en color, altura o densidad).

Los suelos del área de estudio presentan hidromorfismo debido a los constantes encharcamientos y ascensos de la tabla de agua, por lo que estos suelos estarían dentro del suborden de los *aquerts* (PROMAS 2012). Además son suelos que difieren entre sitios debido a que existe material transportado por el hombre (fácilmente observables a campo) al construir la vía y que al pasar el tiempo se fue aplicando labranza, alterando su estructura y modificando el ordenamiento de partículas, resultando así suelos alterados.

En cuanto a la consistencia del suelo, se observa que existe una dependencia de la textura, contenido de coloides orgánicos y minerales, de la estructura, y principalmente del contenido de humedad del suelo, esto indica que cuando disminuye la humedad el suelo pierde su adherencia y plasticidad, y cuando se seca se vuelve duro y coherente (Delgadillo 2014). En cuanto al color de suelo: naranja amarillento opaco, puede deberse a la presencia de óxido de hierro (amarillo, pardo, anaranjado y rojo) existentes en el área.

La presencia de colores oscuros puede deberse a que existe un mal drenaje o al contenido de materia orgánica muy descompuesta u óxidos de magnesio (FAO 2009).

Respecto al ajuste de las ecuaciones de calibración, se obtuvo un coeficiente de determinación ($R^2_{aj} > 0,47$) cercano a 0.5, para los primeros 20 cm de suelo en la parcela 1. Sin embargo, se aprecia una disminución en el coeficiente de determinación más allá de esta profundidad, ya que los horizontes inferiores son de textura más fina que los superiores. Esto indica que los sensores TDR tienden a reducir su precisión en suelos arcillosos según Robinson et al. (2003). Presentando mayores errores en suelos que presentan arcillas expansivas, como es el caso de los suelos presentes en el área de estudio de esta investigación, donde se muestran resultados bajos en el ajuste de la curva de calibración. Igual resultado (valores de R^2_{aj} entre 0.65 – 0.96 a profundidad de 30 cm) fue reportado por Loaiza y Pauwels (2008), en suelos superficiales, calcáreos y pedregosos en España. La diferencia respecto a estos autores puede deberse a que ellos trabajaron bajo condiciones de suelo sin problemas de retención de humedad y con buenas condiciones de drenaje. Otros autores como Vargas et al. (2011) reportan valores de R^2_{aj} de 0.72; 0.43 y 0.46 a profundidad de 0-20; 20-40 y 40-60 cm respectivamente en suelos agrícolas de textura arcillo-limoso en San Rafael de Onoto, Venezuela.

La parcela 2 presenta pedregosidad y desnivel causado por la acumulación de suelo de la carretera, mientras que la parcela 3 presenta un nivel freático mucho más elevado que las otras parcelas. Estas parcelas presentan raíces de pasto que afectan las lecturas del contenido de humedad del suelo registrados por el sensor y por el gravimétrico, puesto que las raíces contienen grandes cantidades de agua, numerosos constituyentes orgánicos, agua unida a geles citoplasmáticos, celulosa, etc.

Por otra parte, las propiedades físicas y morfológicas del suelo podrían explicar el aumento de la capacidad de almacenamiento y retención de agua a profundidades mayores de 20 cm. Otro factor importante a tomar en cuenta durante el análisis de la humedad es la presencia de raíces de pasto y la pedregosidad en las parcelas 2 y 3, las cuales afectan las lecturas del contenido de humedad del suelo registrado por el sensor, puesto que las raíces contienen grandes cantidades de agua, numerosos constituyentes orgánicos, agua unida a geles citoplasmáticos, celulosa, etc.

A pesar de que los suelos en estudio dentro de cada parcela se encuentren muy próximos, su comportamiento hídrico es muy variable entre las lecturas registradas de los TDR lo que enfatiza una alta variabilidad de los suelos. Las diferencias en el comportamiento hídrico del suelo en cortas distancias podría deberse a factores, como la posición topográfica que determina la dirección y la velocidad de los flujos hídricos, al material coluvial producto de la vía y a la influencia de la acequia.

La generalización de estos resultados está sujeta a ciertas limitaciones, por ejemplo: El equipo utilizado para determinar el contenido de humedad estaba programado para registrar valores hasta el 50 % de humedad. Por lo que en la investigación los valores 99999 se transformaron a capacidad máxima del sensor (50 % de humedad) para mejorar la calidad de los datos y poderlos analizar. Dándonos como posibles efectos correlaciones muy bajas.

En segundo lugar radica el hecho de que no se logró controlar por completo la acumulación del agua en las excavaciones debido a que las parcelas de monitoreo se encontraban cerca de la pendiente y de canales de evacuación hídrica.

Otra posible limitación se centra en la aplicación de esta metodología, ya que, con este método se pensaba que se podría eliminar el efecto de la variabilidad

espacial pero, contrariamente a lo esperado se observó un comportamiento hídrico variable en el método gravimétrico, lo que explica un elevado nivel freático.

Todas estas limitaciones se han superado analizando los datos desde diferentes ángulos con el fin de obtener una ecuación de calibración óptima. Sin embargo, el periodo de monitoreo (30 días) no es suficiente para alcanzar un secado óptimo de dicho suelo, y solamente se ha llegado a obtener valores cercanos a capacidad de campo.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos con el método de campo y laboratorio, podemos concluir lo siguiente:

- La zona 1 cuenta con una mayor variabilidad en sus propiedades morfológicas en relación a las zonas 2 y 3, esto implica posibles alteraciones o incorporación de suelo.
- Al analizar las propiedades morfológicas de cada zona con respecto a la profundidad se observa que existe una mínima variación.
- En condiciones muy altas de humedad (época de invierno) existe encharcamiento de agua en las zonas 2 y 3. Por lo que las capas superiores de dichas zonas casi no varían en cuanto al contenido de humedad.

- Se obtuvo la ecuación de calibración para el TDR CS655, al relacionar la medición de la humedad del suelo mediante el TDR (Time Domain Reflectometry) con los datos de la humedad volumétrica obtenidos en el laboratorio, dándonos un valor de $R^2_{aj} = 0.47$ con la cual, se sugiere que es aceptable para monitorear con seguridad el contenido de humedad en el suelo a la profundidad de 0 – 20 cm a nivel de parcela con estas características de suelo.
- Para las profundidades de 20 - 60 cm las ecuaciones de calibración no dieron buenos resultados, debido a que, durante el desarrollo de esta investigación el suelo de esta área siempre permaneció saturado a dicha profundidad, lo que limitó al sensor registrar lecturas más precisas del contenido de humedad.
- Los valores de contenidos de humedad muestran que durante el periodo de monitoreo de 30 días, no se alcanzó la capacidad de campo, lo que demuestra que son suelos muy arcillosos y que el nivel freático está alto en estos sitios.

7.2. Recomendaciones

- Es importante tener en cuenta el efecto de la gravedad ya que al inicio del proceso de secado del suelo in situ, el contenido volumétrico del agua entre la parte superior y la parte inferior tienden a homogenizarse al cabo de pocos días por lo que se recomienda tomar las mediciones del contenido de humedad por lo menos 5 días después de la instalación con el fin de que se estabilicen los equipos y el suelo, lo cual ayudara a evitar errores.



- Para la calibración en suelos arcillosos se recomienda determinar en qué tipo de arcilla se está calibrando.
- Realizar la calibración del sensor con muestras de este mismo tipo de suelo bajo condiciones controladas, llevando muestras al laboratorio induciendo un estado de secado controlado para tener datos más completos.
- Al tener una mínima variación en sus propiedades morfológicas de cada zona con respecto a su profundidad, se podría utilizar esta ecuación de calibración para capas más profundas.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Baez A; Etchevers J.D; Morales F; Prat Christian; Hidalgo C. Calibración in situ de un TDR en substratos de origen volcánico del estado de México y Tlaxcala. *In* Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Leon: SLCS, 2007, 1 p. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 17, Leon (MEX).
- Birkeland, P. 1999. Soils and Geomorphology: Calculation of Profile-Development index. Oxford, New York, 3rd Ed. Oxford University Press, 430p.
- Borja, P; Iñiguez, V; Crespo, P; Cisneros, P; Cisneros, F; Feyen, J. Caracterización Hídrica de Andosoles e Histosoles del Austro del Ecuador. *In* XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, 2008, Quito, Ecuador, Caracterización Hídrica de Andosoles e Histosoles del Austro del Ecuador 10p.
- Campbell Scientific Inc. 2016. CS650 and CS655 Water Content Reflectometers, Instruction Manual, Revision: 6/16. s.l., Campbell Scientific, Inc., 58.
- Černý, R. 2009. Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review. *Measurement* 42(3): 329-336.
- Delgadillo, L. 2014. Instituto de Geología Manual de Procedimientos Analíticos Física de Suelos. 2014.
- Dobriyal, P; Qureshi, A; Badola, R; Hussain, SA. 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology* 458-459: 110-117.



FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación 2009: 100.

Hernández, A; Ascanio, M; Morales, M; Bojórquez, J; Garcia, N; Garcia, J. 2006. El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. 1 era ed s.l., Universidad Autónoma de Nayarit, 220.

IMKO. 2001. TRIME-FM User Manual. 2001: 22.

IMKO. 2012. *Precise moisture measurement*. Recuperado el 26 de Marzo de 2015, de <http://imko.de/en/about-trime-tdr>

Instituto Espacial Ecuatoriano. 2012. Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional a escala 1:25000. 2012.

Inzunza, M jr; Inzunza M; Catalan, E; Villa, M; Delgado, G. 2012. Calibración de TDR para estimar el contenido de humedad volumétrica en el suelo. Relación Agua-Suelo-Planta. Agrofaz 12(3): 59-65.

Jaramillo, D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. s.l., Universidad Nacional de Colombia, 613.

Jackson, S .2004. In Situ Calibration of Time Domain Reflectometry Sensors in Multiple Soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 35(5-6): 865-878.

Jones, SB; Wraith, JM; Or, D. 2002. Time Domain Reflectometry measurement principles and applications. Hydrological Processes 16(1): 141-153.

- Ledieu, J; De Ridder, P; De Clerck, P; Dautrebande, S.1986. A method of measuring soil moisture by Time Domain Reflectometry. Journal Hydrology. 88: 319-328.
- Loaiza, J; Pauwels, V. 2008. Utilización de sensores de humedad para la determinación del contenido de humedad del suelo (ecuaciones de calibración). SUELOS ECUATORIALES 38(1): 24-33.
- Mojid; Cho. 2004. Evaluation of the time-domain reflectometry (TDR) - measured composite dielectric constant of root mixed soils for estimating soil-water content and root density. Journal Hydrology(295), 263 - 275.
- Naranjo, M; Ataroff, M. 2015. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS TDR PARA SU USO EN SUELOS NO DISTURBADOS. INTERCIENCIA 40: 416-422.
- Noborio, K. 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Computers and Electronics in Agriculture 31(3): 213-237.
- PROMAS. 2012. Diseño del Sistema de Riego «Granja universitaria IRQUIS». 1-26p.
- QGIS Development Team. 2016 QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. URL <http://www.qgis.org/>.
- R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

- Robinson, D.A; Jones, S.B; Wraith, J.M; Or, D; Fredman, S.P. 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal* no.1996: 444-475.
- Roth, K; Schulin, R; Flühler, H; Attinger, W. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research* 26(10): 2267-2273.
- Thien, SJ. 1979. A flow diagram for teaching texture-by-feel analysis. *Journal of Agronomic Education* 8: 54-55.
- Topp, G; Davis, J; Bailey, W; Zebchuk, W. 1984. The Measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. *Can. J. Soil Sci.* 64: 313-321.
- Topp, GC; Davis, JL; Annan, AP. 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research* 16(3): 574-582.
- Vargas, J; Espana, R; Guerrero, J. 2011. Calibración de la sonda TDR-300 para mediciones de humedad del suelo en San Rafael de Onoto, Venezuela. *Unellez*. 29: 89-93.
- Zanetti, SS; Cecílio, RA; Silva, VH; Alves, EG. 2015. General calibration of TDR to assess the moisture of tropical soils using artificial neural networks. *JOURNAL OF HYDROLOGY* 530: 657-666.
- Zhao, Y; Ling, D; Wang, Y; Huang, B; Wang, H. 2016. Study on a calibration equation for soil water content in field tests using time domain reflectometry *. *17(3)*: 240-252.

9. ANEXOS

Anexo 1.

a) Ficha de levantamiento de datos de laboratorio para la obtención del contenido de agua del suelo

FICHA DE LABORATORIO															Nº 6.			
REGISTRO DE DATOS PARA LA OBTENCION DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO																		
Muestreador																		
Campo						Datos del anillo				Peso en gramos (gr)					Volumen del nucleo del anillo (cm)			
FECHA	HORA	Sitio	Parcela	Codigo Aleatorio	Profundidad (cm)	CODIGO Anillo	Altura del cilindro(cm)	Diametro del cilindro (cm)	Peso Anillo (gr) (A)	Peso anillo + Suelo Humedo (B)	Peso Humedo (C)	Peso Anillo + Suelo Seco (D)	Peso del Suelo Seco (E = D - A)	Peso del Agua (F = C - E)	Contenido Gravimetrico de Agua $G = \frac{F}{C} \cdot 100$	Volumen de Suelo (H)	Densidad Aparente (I = E/H)	Contenido Volumetrico de Agua (J = G * I)

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016



b) Ficha de registro de barrenaciones para la descripción de las propiedades morfológicas del suelo en el área de estudio.

FECHA:	EROSION/TIPO:
COORDENADAS UTM:	COVERTURA:
POSICION FISIOGRAFICA:	MUESTREADOR:

Nº	TRANS	PROF (cm)	COLOR			CONSISTENCIA				ESTIMACION DE	OBSERVACIONES
			SECO	HUMEDO	MOJADO	SECO	HUMEDO	MOJADO		LA CLASE TEXTURAL	
								PLASTICIDAD	ELASTICIDAD		
1		0-20									
		20-40									
		40-60									
2		0-20									
		20-40									
		40-60									
3		0-20									
		20-40									
		40-60									
4		0-21									
		20-41									
		40-61									
5		0-21									
		20-41									
		40-61									
6		0-21									
		20-41									
		40-61									

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

Anexo 2. Diseño aleatorizado de las subparcelas divididas en 100 zonas de 1dm², para obtener 90 muestras aleatoriamente, uno por día y profundidad, durante 30 días

SITIO 1

Valores de TDR TRIME

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	44	21	65	59	94	46	69	43	11	56
2	55	35	98	75	86	45	62	24	16	20
3	19	50	18	27	70	30	95	38	34	91
4	80	93	49	2	73	7	67	28	58	39
5	22	100	42	85	89	26	31	5	51	10
6	95	53	68	41	15	47	14	84	12	33
7	81	95	90	1	66	3	23	72	54	9
8	83	71	61	76	78	36	92	4	64	35
9	29	32	40	82	6	63	37	57	8	87
10	13	45	00	74	79	25	52	77	17	97

PLOT 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	3	20	19	62	13	72	39	50	95	77
2	58	5	33	23	65	30	51	9	67	53
3	27	94	73	43	78	91	55	12	75	24
4	60	18	29	10	57	61	100	2	93	32
5	17	39	40	63	39	45	16	8	38	56
6	82	22	35	52	56	6	54	97	28	36
7	70	42	34	64	14	37	83	99	7	86
8	81	48	90	68	31	47	15	25	76	52
9	26	79	85	41	80	96	44	98	74	1
10	49	88	4	87	11	46	84	71	69	21

PLOT 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	90	80	12	19	13	16	57	10	63	59
2	7	05	95	52	70	23	97	58	14	34
3	9	62	25	96	20	86	36	99	11	31
4	21	08	17	93	09	33	54	39	53	25
5	27	28	2	64	5	30	74	45	66	42
6	37	100	48	44	43	72	38	41	83	3
7	77	84	32	75	46	94	52	60	67	35
8	71	47	45	73	56	4	81	61	79	55
9	91	22	88	87	17	11	82	98	1	85
10	40	20	24	89	6	8	78	15	76	50

PLOT 3

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

VALORES DE MUESTREO GRAVIMETRICO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	2	76	85	17	32	81	97	50	88	47
2	45	59	73	42	64	58	62	51	14	40
3	60	49	23	21	1	16	7	41	13	25
4	20	74	19	56	5	05	80	31	18	93
5	71	34	77	54	44	11	48	8	12	27
6	4	87	70	3	96	89	35	53	98	90
7	83	43	30	67	52	92	63	15	46	100
8	6	57	75	82	16	28	29	66	10	79
9	99	72	84	92	94	39	55	68	37	91
10	78	38	61	22	69	24	33	86	26	5

PLOT 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	44	78	25	52	18	3	27	11	71	89
2	83	35	88	59	33	91	70	54	36	63
3	99	45	50	39	19	5	96	10	7	4
4	13	47	93	82	46	69	9	94	20	87
5	26	42	95	65	6	43	89	37	21	77
6	85	90	53	55	79	24	23	49	48	25
7	58	41	1	72	73	60	76	12	56	97
8	80	84	67	38	31	81	15	74	2	14
9	100	68	30	92	16	51	8	22	98	32
10	64	40	75	57	28	56	24	17	61	62

PLOT 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	34	36	14	93	98	32	4	79	82	70
2	41	59	75	84	29	72	67	43	61	66
3	88	78	50	60	12	22	53	96	30	42
4	90	71	15	39	08	13	37	11	78	18
5	64	46	55	25	74	56	21	86	52	2
6	47	69	8	38	99	8	73	58	65	57
7	31	94	17	5	85	16	60	3	83	45
8	49	23	10	92	35	51	87	28	81	19
9	44	77	9	7	1	95	54	24	89	27
10	20	80	97	100	26	51	33	48	62	40

PLOT 3

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

SITIO 2

VALOR DEL MUESTREO GRAVIMETRICO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	78	88	56	69	94	47	95	11	17	75
2	74	97	86	4	71	58	20	1	7	84
3	15	73	33	20	34	6	93	65	80	45
4	55	99	36	9	22	5	96	44	32	89
5	3	75	85	41	29	66	40	30	63	38
6	42	87	37	72	25	70	19	48	60	12
7	33	57	27	79	14	26	100	81	18	50
8	35	46	49	61	10	53	91	98	23	68
9	36	77	21	43	52	31	82	24	2	83
10	54	62	39	59	67	92	64	8	51	90

PLOT 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	39	66	8	88	42	80	53	54	82	64
2	27	18	20	21	17	85	49	25	23	63
3	52	97	84	6	26	12	36	30	41	2
4	56	65	31	22	19	9	78	71	74	100
5	69	61	16	50	2	91	5	44	47	35
6	46	32	92	98	80	79	73	72	13	62
7	45	96	95	51	81	91	48	89	55	11
8	70	34	75	67	94	87	77	37	4	10
9	43	24	90	83	29	1	68	60	14	13
10	33	38	59	76	50	99	28	7	57	40

PLOT 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	75	100	72	78	26	42	11	66	44	57
2	80	10	82	89	71	13	15	50	95	54
3	38	99	56	81	55	7	88	90	98	14
4	85	48	1	12	19	60	31	35	68	33
5	97	65	36	2	25	49	92	34	58	40
6	41	63	51	28	64	86	27	10	91	62
7	70	75	20	39	0	9	8	32	73	46
8	61	57	84	87	74	23	96	47	43	83
9	22	3	29	5	59	45	17	77	21	76
10	93	37	53	52	6	94	69	30	24	15

PLOT 3

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

SITIO 3

VALOR DEL MUESTREO GRAVIMETRICO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	87	13	12	85	15	32	71	81	47	84
2	16	23	2	32	28	41	51	94	75	95
3	80	49	88	93	45	36	21	96	5	53
4	58	1	25	82	46	40	34	81	6	75
5	9	68	55	90	27	8	25	65	35	52
6	10	29	75	74	31	24	85	34	33	72
7	59	60	13	54	86	22	20	79	89	37
8	7	42	17	55	11	69	62	48	57	18
9	63	90	43	17	81	100	64	91	38	70
10	25	3	67	80	73	0	77	58	95	39

PLOT 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	93	66	18	10	5	43	18	47	52	51
2	22	61	2	73	69	71	34	4	44	46
3	88	42	3	85	58	59	32	51	13	72
4	81	82	37	29	83	94	28	85	39	77
5	1	50	6	10	60	87	79	45	56	1
6	39	75	100	27	33	74	45	97	96	86
7	98	15	15	54	86	8	69	36	30	10
8	21	11	13	76	89	89	67	70	17	17
9	30	71	25	41	50	78	92	12	11	64
10	90	40	7	14	39	87	29	88	95	48

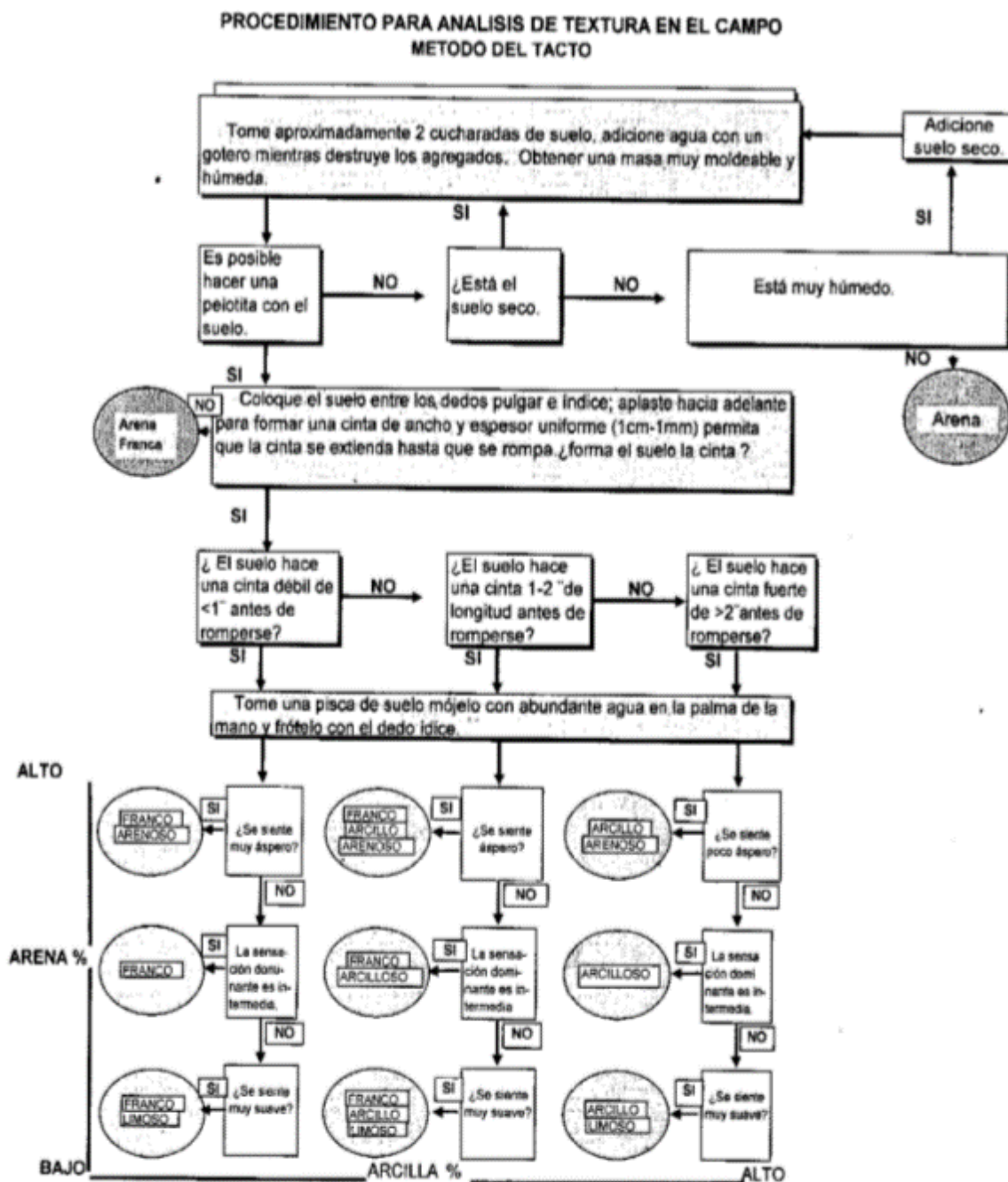
PLOT 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	22	11	72	40	69	68	38	47	53	15
2	85	8	50	71	30	60	77	2	10	62
3	64	23	21	28	67	17	81	19	59	63
4	48	36	100	80	3	33	75	32	41	20
5	74	17	57	89	9	58	51	3	91	70
6	40	20	78	11	96	43	65	54	27	38
7	34	1	40	82	75	4	94	14	50	76
8	13	13	18	88	87	55	25	12	16	13
9	35	46	16	65	6	52	95	22	35	36
10	42	83	86	73	60	61	57	85	92	2

PLOT 3

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

Anexo 3. Lineamiento para la determinación de la textura



Anexo 4. Tablas de porcentaje de frecuencia a mayor detalle consideradas para la descripción de suelos en el área de estudio

a) Distribución de frecuencia (%) para la dureza encontrada en cada sitio en función de la profundidad

Profundidad	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
Variables	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Suave a	2.08	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00
ligeramente duro	0.00	0.00	0.00	4.17	0.00	9.09	4.17	0.00	9.09
Ligeramente duro	8.33	8.33	9.09	2.08	8.33	0.00	2.08	8.33	0.00
Ligeramente duro a									
duro	18.75	0.00	0.00	41.67	0.00	0.00	41.67	0.00	0.00
Duro	6.25	0.00	0.00	6.25	0.00	0.00	6.25	0.00	0.00
Duro a muy duro	29.17	0.00	9.09	16.67	16.67	0.00	16.67	16.67	0.00
Muy duro	12.5	8.33	18.18	8.33	8.33	36.36	8.33	8.33	36.36
Muy duro a									
extremadamente	22.92	83.33	63.64	16.67	66.67	54.55	16.67	66.67	54.55
duro									
Extremadamente									
duro									

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

b) Distribución de frecuencia (%) para la friabilidad encontrada en cada sitio en función de la profundidad

Profundidad	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
Variables	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Muy friable	18.75	0.00	0.00	41.67	25.00	18.18	41.67	25.00	18.18
Muy friable a friable	8.33	8.33	0.00	10.42	8.33	0.00	10.42	8.33	0.00
Friable	37.50	8.33	9.09	29.17	0.00	9.09	29.17	0.00	9.09
Friable a firme	6.25	25.00	63.64	2.08	8.33	18.18	2.08	8.33	18.18
Firme	16.67	16.67	18.18	8.33	16.67	36.36	8.33	16.67	36.36
Firme a muy firme	0.00	0.00	9.09	4.17	25.00	9.09	4.17	25.00	9.09
Muy firme	10.42	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00
Muy firme a									
extremadamente	0.00	33.33	0.00	0.00	16.67	9.09	0.00	16.67	9.09
firme									
Extremadamente	2.08	8.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
firme									

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

c) **Distribución de frecuencia (%) para la plasticidad encontrada en cada sitio en función de la profundidad**

Profundidad	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
Variables	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
No plástico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00
Ligeramente plástico	4.17	0.00	27.27	0.00	8.33	9.09	0.00	8.33	9.09
Ligeramente plástico a plástico	4.17	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00
Plástico	52.08	66.67	45.46	56.25	25	9.09	54.17	25	9.09
Plástico a muy plástico	20.83	33.33	9.09	20.83	16.67	9.09	20.83	16.67	9.09
Muy plástico	18.75	0.00	18.18	20.83	50	72.73	20.83	50	72.73

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

d) **Distribución de frecuencia (%) para la adhesividad encontrada en cada sitio en función de la profundidad**

Profundidad	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
Variables	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
No adherente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00
Ligeramente adherente	31.25	0.00	0.00	31.25	0.00	0.00	31.25	0.00	0.00
Ligeramente adherente a adherente	4.17	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00
Adherente	54.17	66.67	72.73	47.92	50	81.82	45.83	50	81.82
Adherente a muy adherente	8.33	33.33	27.27	10.42	41.67	18.18	10.42	41.67	18.18
Muy adherente	2.08	0.00	0.00	6.25	8.33	0.00	6.25	8.33	0.00

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

e) Distribución de frecuencia (%) para la textura encontrada en cada sitio en función de la profundidad

Profundidad Variables	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Arcillo arenoso	54.17	66.67	90.91	31.25	33.33	54.55	31.25	33.33	54.55
Arcillo limoso	0.00	0.00	0.00	8.33	33.33	0.00	8.33	33.33	0.00
Arcilloso	41.67	25	9.09	54.17	33.33	36.36	54.17	33.33	36.36
Arena franca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00
Franco arcillo arenoso	2.08	0.00	0.00	4.17	0.00	9.09	2.08	0.00	9.09
Franco arcillo limoso	2.08	8.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Franco arcilloso	0.00	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

f) Distribución de frecuencia (%) del color en seco de cada sitio en función de la profundidad

Profundidad Variables	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
Gris claro	2.08	0.00	0.00	4.17	8.33	0.00	0.00	0.00	0.00
Gris claro grisáceo	0.00	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00	2.08	0.00	0.00
gris parduzco	0.00	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00
Marrón amarillento opaco	8.33	16.67	9.09	6.25	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00
Marrón apagado	2.08	8.33	9.09	0.00	8.33	0.00	2.08	0.00	0.00
Marrón grisáceo	6.25	16.67	18.18	4.17	0.00	18.18	12.50	0.00	36.36
Naranja amarillento claro	0.00	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00	2.08	8.33	0.00
Naranja amarillento opaco	81.25	58.33	63.64	81.25	66.67	81.82	77.08	75	63.64
Naranja amarillo claro	0.00	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00	0.00	0.00	0.00
Naranja opaco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

g) **Distribución de frecuencia (%) para el color en húmedo encontrada en cada sitio en función de la profundidad**

Profundidad Variables	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Marrón	6.25	0.00	0.00	18.75	50	0.00	14.58	33.33	45.46
Marrón grisáceo	2.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00	0.00
Marrón muy oscuro	6.25	8.33	9.09	6.25	0.00	0.00	6.25	8.33	18.18
Marrón oscuro	14.58	8.33	0.00	50	8.33	63.64	50	41.67	27.27
Negro parduzco	70.83	83.33	90.91	25	41.67	36.36	20.83	16.67	9.09

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016

h) **Distribución de frecuencia (%) para el color en mojado encontrado en cada sitio en función de la profundidad**

Profundidad Variables	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio	Sitio
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Marrón	10.42	0.00	0.00	16.67	8.33	0.00	10.42	16.67	9.09
Marrón amarillento opaco	0.00	8.33	0.00	2.08	16.67	9.09	0.00	8.33	0.00
Marrón grisáceo	0.00	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00
Marrón muy oscuro	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.09
Marrón oscuro	79.17	58.33	90.91	72.92	75.00	90.91	68.75	66.67	63.64
Negro parduzco	10.42	33.33	9.09	6.25	0.00	0.00	16.67	8.33	18.18

Fuente: Guamán y Cajamarca 2016